

Национальная Академия Наук Украины
Институт технической теплофизики

На правах рукописи

КАРТАВОВА Евгения Сергеевна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В
ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЯХ ЛОПАТОК ГТД

05.14.05 - Теоретическая теплотехника

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

810

Киев, 1997.



Робота виконана в Інституті технічної теплофізики Національної Академії Наук України

Научний керівитель: доктор технічних наук,
ведучий научний співробітник
П.Г. КРУКОВСКИЙ

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Н.І. НИКИТЕНКО
кандидат технічних наук,
Б.В. ДАВЫДЕНКО

Ведущая организация: Міжнародний центр електронно-
лучевих технологій Інститута елек-
тросварки ім.Е.О.Патона,

Защита состоится "3" июня 1997 г. в 13:30 час. на заседа-
нии специализированного ученого совета К 50.04.03 в Институте
технической теплофизики Национальной Академии Наук Украины
по адресу: 252057, г.Киев-57, ул.Желябова, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТТФ НАН
Украины.

Автореферат разослан "20" июня 1997 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета
доктор технических наук

Г.Р.Кудрицкий

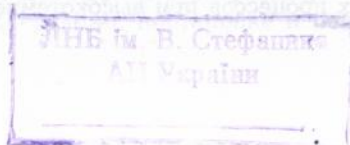
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ресурс работы лопаток современных газовых турбин в значительной степени определяется интенсивностью тепло-массообменных (ТМО) процессов в защитных покрытиях лопаток при высокотемпературной газовой коррозии (ВТГК) и степенью их влияния на механические и прочностные характеристики материала лопаток.

Воздействие теплообменных процессов на материалы лопаток ГТД при ВТГК приводит к снижению их прочности за счет уменьшения рабочего сечения лопатки, изменения состава и структуры поверхностных слоев и т.д. В наиболее сложной форме проблемы прогнозирования теплообменных процессов проявляются при оценке возможного ресурса работы защитных покрытий в условиях высокотемпературной газовой коррозии охлаждаемых лопаток газовых турбин.

В связи с отсутствием надежных методов прогнозирования ресурса работы защитных покрытий лопаток газовых турбин, настоящая работа является актуальной, так как предложенный в ней методический подход позволяет моделировать и прогнозировать тепло-массообменные процессы в защитных покрытиях лопаток промышленных и транспортных ГТУ, работающих в коррозионно-активной среде продуктов сгорания топлива в условиях высоких температур.

Степень исследованности. Из анализа опубликованной литературы следует, что на сегодняшний день методы расчетного исследования массообменных процессов при ВТГК основаны на простых аппроксимационных эмпирических зависимостях (степенного или иного вида) изменения массы при ВТГК и глубины коррозионного повреждения, полученных при обработке экспериментальных данных относительно длительных испытаний материалов. Вид этих моделей-зависимостей и значения их параметров (множители, показатели степени и т.д.), для различных типов и составов сплавов, могут меняться в широком диапазоне интервалов температур и времен, при которых были получены экспериментальные данные. Такое количественное описание массообменных процессов при ВТГК с помощью простых интерполяционных зависимостей относительно изменения массы образца и глубины коррозии от времени и температуры, полученные эмпирическим путем, не содержат математическое описание основных процессов массопереноса при ВТГК. Во многих случаях такие зависимости справедливы только для тех температурно-временных условий, в рамках которых они были получены, и про-



гноз массопереноса при ВТГК путем их экстраполяции может привести к ошибочным результатам.

Цель работы состоит в разработке методического подхода к моделированию тепломассообменных процессов в защитных покрытиях лопаток ГТД для прогнозирования ресурса работы многослойных защитных покрытий.

Задачи исследования:

- разработать физическую и математическую модели тепломассообменных процессов в многослойных защитных покрытиях, лопатке и на их поверхности, основанные на учете основных физико-химических процессов, определяющих ресурс работы лопатки;
- разработать программу, реализующую математическую модель;
- обосновать необходимость и использовать метод идентификации параметров математической модели путем решения обратных задач по данным экспериментальных исследований;
- показать работоспособность предлагаемого методического подхода и модели путем решения ряда тестовых задач расчета ТМО процессов в многослойных защитных покрытиях и поверхностном слое лопатки и сравнения результатов расчета с экспериментальными данными;
- провести прогнозные расчеты ТМО процессов в поверхностном слое лопаток ГТД с защитными покрытиями и без них.

Предмет и метод исследования. Основным предметом исследования являются защитные покрытия на лопатках ГТД и моделирование ТМО процессов при ВТГК с дальнейшим прогнозированием ресурса их работы. Исследование данных процессов проводилось с использованием методов математического моделирования при реализации широкого комплекса вычислительных экспериментов. Использовались также методы решения обратных задач для идентификации параметров математической модели тепломассообменных процессов в защитных покрытиях лопаток ГТД.

Научная новизна.

- предложен методический подход к моделированию и прогнозированию тепломассообменных процессов в системе защитные покрытия-лопатка ГТД, основанный на математической модели тепломассообменных процессов при ВТГК и определении параметров модели путем решения обратных задач с использованием данных экспериментальных исследований.

- разработаны физическая и математическая модели массообменных процессов при высокотемпературной газовой коррозии, описываю-

щие массоперенос легирующих элементов и окислителя в зоны образования продуктов коррозии и кинетику образования оксидного слоя.

- исследован массоперенос в лопатке и образцах из сплава ЭИ893 без покрытий, определена температурная зависимость коэффициентов массопереноса по экспериментальным данным при разных температурах испытаний путем решения обратных задач массопереноса.

- исследован массоперенос в системе защитные покрытия-сплав для нескольких элементов, в системах СДПЗА-ЧС88ВИ и СДП8 - СДП11А - ЧС88ВИ, решением обратных задач определены коэффициенты массопереноса.

- проведено прогнозирование процессов массопереноса в лопатке ГТД из сплава ЭИ893 без покрытий на времена до 100000 часов.

- проведено прогнозирование процессов массопереноса в системе защитные покрытия-лопатка ГТД с внешним керамическим слоем КДП1-СДП8-СДП11А-ЧС88ВИ КДП1, отколовшимся в процессе эксплуатации лопатки. Рассмотрен массоперенос алюминия и хрома - основных легирующих элементов, образующих коррозионный слой, определено время скальвания КДП1 при достижении толщины пленки Al_2O_3 критической толщины. Определено, что при скальвании КДП1 повышается температура металлического слоя максимум на $\sim 50^\circ C$.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается использованием математической модели, адекватной реальным процессам теплообмена, удовлетворительным согласованием результатов расчета с данными экспериментальных исследований, использованием апробированных численных методов расчетных исследований.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Разработанные модель и методический подход к прогнозированию теплообменных процессов при ВТГК предназначены для решения практических задач прогнозирования состояния поверхностного слоя лопатки с защитными покрытиями и без них при произвольных режимах и длительности их эксплуатации. Результаты диссертационной работы использованы для прогнозирования ресурса работы защитных покрытий лопаток газовых турбин при создании корабельных и энергетических ГТД повышенного ресурса, работы на НПП "Машпроект". Разработанный методический подход к моделированию и прогнозированию модели, алгоритмы, и программный комплекс внедрены на предприятии НПП "Машпроект" (г. Николаев).

Личное участие автора в получении научных результатов состоит в разработке основной идеи диссертации, постановке и реше-

нии задач исследования, выполнении расчетных исследований и разработке программного комплекса. Автору принадлежат также обработка, анализ и обобщение полученных данных. Все работы, представленные в соавторстве, выполнялись диссертантом в виде равноправного партнерства.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на: II Международной конференции "Идентификация динамических систем и обратные задачи" (Россия, С.-Петербург, 1994г.), на Всеукраинском семинаре "Проблемы металловедения и обработки сталей" (Киев, сентябрь 1994г.), Международной конференции "Материалы в энергетическом машиностроении" (Бельгия, Льеж, октябрь 1994), III-м Минском Международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, май 1996г.) и на Международной конференции по металлургическим покрытиям и тонким пленкам (США, Сан-Диего, апрель 1997г.). Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков и 3 таблицы, список использованных источников из 206 наименований, и приложения, всего 175 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показаны важность и актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи работы, научная новизна и практическая ценность результатов, связь проведенных исследований с тематикой НИР ИТТФ НАН Украины, информация о внедрении результатов выполненных исследований.

В первой главе рассмотрены современные проблемы защиты лопаток ГТД от высокотемпературной газовой коррозии, а также проведен обзор основных тепломассообменных процессов при ВТГК, определяющих долговечность системы защитные покрытия-лопатка ГТД. Проанализированы современные тенденции эксплуатации промышленных и транспортных газовых турбин, показана актуальность проблемы защиты лопаток ГТД и рассмотрены мероприятия, направленные на повышение долговечности лопаток ГТД. Сформулированы критерии долговечности покрытий.

Проанализированы существующие методы исследования тепломассообменных процессов в системе защитные покрытия лопатки

ГТД. Отмечено, что существующие методы расчетного исследования массообменных процессов при ВТГК основаны на простых аппроксимационных эмпирических зависимостях изменения массы при ВТГК и глубины коррозионного повреждения и во многих случаях не могут быть использованы для прогнозирования массопереноса при ВТГК путем их экстраполяции, поскольку это может привести к ошибочным результатам. При моделировании процессов массопереноса необходимо учитывать, что интенсивность теплообмена между газом и внешней поверхностью на различных участках лопатки может отличаться в несколько раз что приводит к существенной неравномерности поля температур. Поскольку массообменные процессы в защитных покрытиях лопаток ГТД в первую очередь зависят от уровня температур, их прогнозирование должно основываться на детальном анализе теплового состояния лопатки с учетом накопленных знаний о закономерностях кондуктивного и конвективного теплообмена лопаток с газовыми средами. Для возможности осуществления длительного прогноза состояния поверхностных слоев лопаток с покрытиями (распределения элементов в лопатке и покрытиях, проникновения фронта коррозии или окисления вглубь материала лопатки и т.д.) с целью определения ресурса работы покрытий (возможной продолжительности их эксплуатации) метод моделирования и прогнозирования ТМО процессов при ВТГК в системе защитные покрытия-лопатка ГТД должен в себя включать:

- моделирование теплового состояния лопаток;
- моделирование процессов массопереноса в многослойных защитных покрытиях и лопатках;
- планирование и проведение необходимых экспериментальных исследований материала лопаток;
- идентификацию параметров математической модели процессов массопереноса решением обратных задач по данным экспериментальных исследований;

Вторая глава посвящена изложению методического подхода к моделированию и прогнозированию ТМО процессов в системе защитные покрытия-лопатка ГТД, формулировке физической и математической модели процессов тепло- и массообмена.

Методический подход к моделированию и прогнозированию исследуемых ТМО процессов в системе защитные покрытия-лопатка

ГТД можно, в целом, назвать экспериментально-расчетным и разбить на следующие составные части (рис.1):

- математическая модель тепломассообменных процессов;
- определение параметров модели решением обратных задач по имеющимся данным краткосрочных экспериментальных измерений;



Рис.1. Методическая схема экспериментально-расчетного определения ресурса и оптимизации защитных покрытий лопаток ГТД.

- планирование и проведение необходимых экспериментальных исследований материала лопаток;

- прогноз состояния поверхностных слоев лопаток с многослойными защитными покрытиями, в случае адекватности математической модели исследуемым ТМО процессам;

- оптимизации параметров защитных покрытий (толщины, начальной концентрации легирующих элементов и т.д.).

Физическая и математическая модели процессов теплообмена для лопатки хорошо известны, - двух-

или трехмерное уравнение теплопроводности Фурье с граничными условиями конвективного типа на внешней и внутренней поверхностях лопатки при заданном режиме теплового нагружения. Физическую модель процессов массопереноса (диффузионного перераспределения и фронтальной коррозии) можно представить следующим образом. Легирующие элементы (Me), расходуемые на образование оксидной фазы, диффундируют из основного сплава в направлении к внешней поверхности (рис. 2). Навстречу им, в противоположном

направлении, диффундирует окислитель (Ох), который адсорбируется на поверхности оксидной пленки из газовой среды.

Химическое взаимодействие легирующих элементов с окислителем приводит к образованию оксидного (коррозионного) слоя из оксидов преимущественно оксидообразующих легирующих элементов. На рис.2 приведено типичное для легированного сплава пространственное распределение концентрации (кривая 3) одного из оксидообразующих элементов в поверхностном слое окисленного сплава.

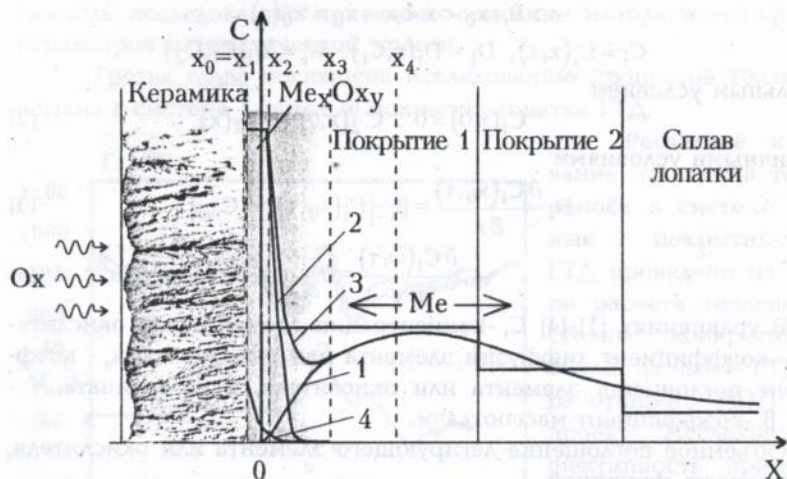


Рис.2. Качественное распределение концентрации легирующего элемента (Me) и окислителя (Ох). Кривая 1 - "свободный" легирующий элемент; 2 - "связанный" легирующий элемент; 3 - суммарная концентрация легирующего элемента; 4 - концентрация окислителя.

В поверхностном слое можно выделить следующие основные зоны (рис.2): 1 - зона сплошной оксидной пленки $x_0=x_1 < x < x_2$; 2 - зона внутреннего окисления $x_2 < x < x_3$; 3 - зона обезлегиrowания основными легирующими элементами сплава $x_3 < x < x_4$. $x_0=x_1$ - координата внешней подвижной границы сплошной оксидной пленки в случае отсутствия ее повреждения вследствие эрозии, скалывания и уноса в газовый поток ($x_0 \neq x_1$), x_1 - координата внешней подвижной границы в случае уноса продуктов окисления в поток, x_2, x_3, x_4 - координаты внутренних границ зон сплошной оксидной пленки, внутреннего окисления и обезлегиrowания соответственно. Рассмотренный физи-

ческий процесс массопереноса нестационарен, границы x_0, x_1, x_2, x_3, x_4 - подвижны, границы x_2, x_3, x_4 движутся вглубь сплава.

Математическая модель представляет собой систему нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений диффузии окислителя ($i=1$) или легирующего элемента ($i=2$), в зону образования продуктов коррозии:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \right] - W_i \quad (1)$$

$$\tau > 0, \quad x_0 < x < \infty, \quad x_0 = x_0(\tau)$$

$$C_i = C_i(x, \tau), \quad D_i = D_i(x, C_i), \quad W_i = W_i(C_1, C_2)$$

с начальным условием

$$C_1(x, 0) = 0, \quad C_2(x, 0) = C_2(x) \quad (2)$$

и граничными условиями

$$D_i \frac{\partial C_i(x_0, \tau)}{\partial x} = \beta_i \cdot [C_i(x_0, \tau) - C_{i\infty}] \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_i(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

В уравнениях (1)-(4) C_i - концентрации элемента или окислителя, D_i - коэффициент диффузии элемента или окислителя, k_i - коэффициент поглощения элемента или окислителя, x - координата, τ - время, β_i - коэффициент массоотдачи.

Объемное поглощение легирующего элемента или окислителя, можно описать функцией

$$W_i = k_i \cdot C_1 \cdot C_2 \quad (5)$$

Концентрация C_2^C связанного легирующего элемента для координаты x и момента времени τ рассчитывается по формуле

$$C_2^C(x, \tau) = \int_0^{\tau} W_2(x, \tau) d\tau \quad (6)$$

Суммарная концентрация легирующего элемента

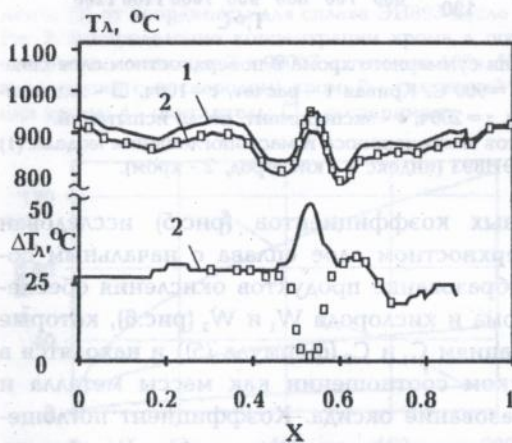
$$C_i^T(x, \tau) = C_i^C(x, \tau) + C_i(x, \tau) \quad (7)$$

Граница x_2 рассчитывается, как координата, для которой величина C_2^C , рассчитанная по (5), достигла известного значения $C_2^C \max$; граница x_3 как координата, в которой $C_2^C = 0.05 \cdot C_1^C \max$; граница x_4 как граница, где $C_2 = 0.95 C_2^C \max(0, x)$. Граница x_1 рассчитывается как разность между унесенной толщиной и толщиной сплошной оксидной пленки без уноса. Граница x_0 рассчитывается в соответствии с изменением объема окисленной области.

Для интегрирования модели выбран метод конечных разностей с использованием неявной разностной сетки с итерационной схемой учета нелинейностей. Это позволяет учесть самые общие особенности постановки задачи, -многослойность, зависимость любых коэффициентов модели от координаты, концентрации и времени.

Во второй главе также обоснована необходимость использования и использован метод идентификации параметров математической модели путем решения обратных задач по данным экспериментальных исследований, приведено описание метода идентификации параметров математической модели.

Третья глава посвящена исследованию процессов теплообмена в системе защитные покрытия-лопатка ГТД.



Расчетное исследование процессов теплопереноса в системе защитные покрытия-лопатка ГТД проведено на примере расчета теплового состояния конкретной рабочей лопатки ГТД, разработанного НПП "Машпроект". Исследована эффективность применения внешнего керамического слоя стабилизированного оксида циркония (рис.3).

Рис.3. Распределение температуры T_L по профилю рабочей лопатки и тепловая эффективность ΔT_L внешнего керамического слоя; 1 - лопатка без покрытия; 2 - лопатка с покрытием; □ - лопатка с частично отколовшимся покрытием.

В третьей главе также приводятся результаты применения математической модели, методов идентификации ее параметров и программы для расчетного исследования массообменных процессов в многослойных системах защитные покрытия-лопатка и лопатке без покрытий. Расчетное исследование процессов массообмена в лопатке и образцах без покрытий было проведено для сплава ЭИ893. С помощью методов решения обратных задач по экспериментальным распределениям хрома для 100ч для сплава ЭИ893 при $T=900^{\circ}\text{C}$ (рис.4) определялись параметры массопереноса

основного оксидообразующего элемента - хрома и окислителя - кислорода. Результаты расчета коэффициентов приведены на рис.5.

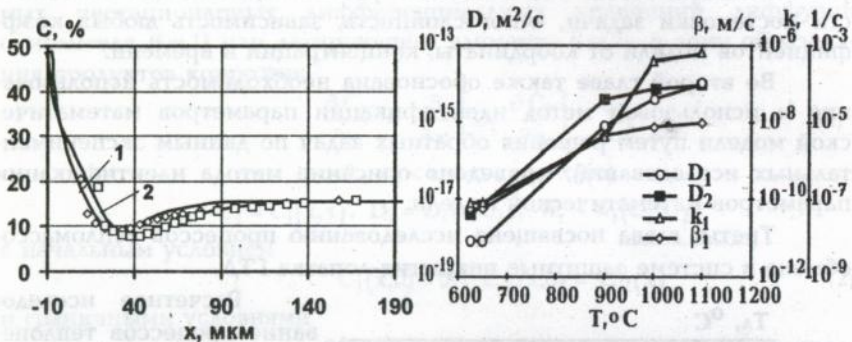


Рис.4. Распределение концентрации суммарного хрома в поверхностном слое сплава ЭИ893 после окисления при $T=900^{\circ}\text{C}$. Кривая 1 - расчет, $\tau=100\text{ч}$, \square - эксперимент, после испытаний, 2 - расчет, $\tau=200\text{ч}$, \diamond - эксперимент, после испытаний.

Рис.5. Зависимость коэффициентов массопереноса и массопоглощения модели (1) - (7) от температуры для сплава ЭИ893 (индекс 1 - кислород, 2 - хром).

С помощью найденных коэффициентов (рис.5) исследован массоперенос хрома в поверхностном слое сплава с начальным содержанием хрома $\sim 15,6\%$. Образование продуктов окисления обеспечивается стоками массы хрома и кислорода W_1 и W_2 (рис.6), которые пропорциональны концентрациям C_1 и C_2 (формула (5)) и находятся в примерном стехиометрическом соотношении как массы металла и окислителя, идущих на образование оксида. Коэффициент поглощения k_1 (рис.6) характеризует интенсивность стока массы W_1 окислителя, поступающего в зону образования оксида.

По найденным параметрам модели рассчитывались концентрации свободного, связанного и суммарного хрома (рис.7). Результаты расчета показывают, что предложенная модель (1)-(7) качественно и количественно описывает сложные процессы массопереноса и образование продуктов коррозии в поверхностных слоях сплава. Найденные решением обратных задач коэффициенты массопереноса для 100ч были использованы для расчета состояния поверхностного слоя сплава при 200ч. Результаты расчета (рис. 4) показывают, что разработанная математическая модель адекватно описывает процессы массопереноса.

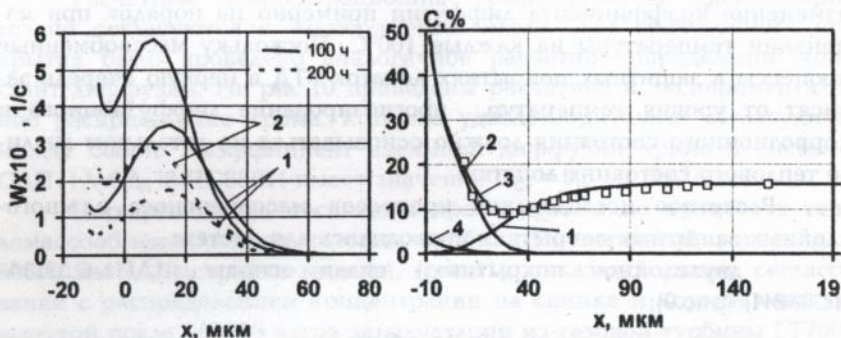


Рис. 6. Зависимость стока массы W окислителя (кривая 1) и легирующего элемента (2) от координаты для сплава ЭИ893 после окисления при $T=900^{\circ}\text{C}$.

Рис.7. Распределение концентрации хрома в поверхностном слое сплава ЭИ893 после окисления при $T=900^{\circ}\text{C}$ в течении 100ч. Кривая 1 - свободный (не прореагировавший с кислородом) хром; 2 - связанный хром; 3 - суммарная концентрация хрома; 4 - окислитель; \square - эксперимент.

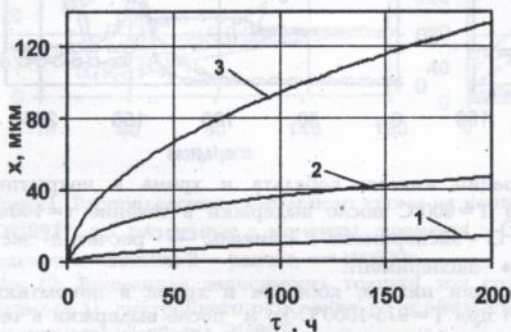


Рис.8. Зависимость толщин зон сплошной оксидной пленки (кривая 1), внутреннего окисления (2) и обезлегироваия (3), от времени в поверхностном слое сплава ЭИ893 после окисления при $T=900^{\circ}\text{C}$ в течении 200ч.

Предложенная модель также позволяет рассчитывать глубину залегания зон сплошной оксидной пленки x_2-x_0 , внутреннего окисления x_3-x_0 и обезлегироваия x_4-x_0 . (рис.8). Аналогичные расчетные исследования были проведены для образцов и лопатки из сплава ЭИ893 для ряда температур.

Как показал анализ полученных параметров модели коэффициенты массопереноса в большой степени зависят от уровня локальных температур. Температурная зависимость коэффициентов диффузии хрома (основного элемента, повышающего коррозионную стойкость сплава) и кислорода (рис.5), найденных решением обратных задач массопереноса по экспериментальным данным краткосрочных испытаний образцов из сплава ЭИ893, показывает

изменение коэффициента диффузии примерно на порядок при изменении температуры на каждые 100°C. Поскольку массообменные процессы в защитных покрытиях лопаток ГТД в первую очередь зависят от уровня температур, прогнозирование диффузионного и коррозионного состояния должно основываться на детальном анализе теплового состояния лопатки.

Расчетное исследование процессов массопереноса в многослойных защитных покрытиях проводилось для систем:

- двухслойное покрытие - сплав основы (КДП1-СДПЗА-ЧС88ВИ) (рис.9);

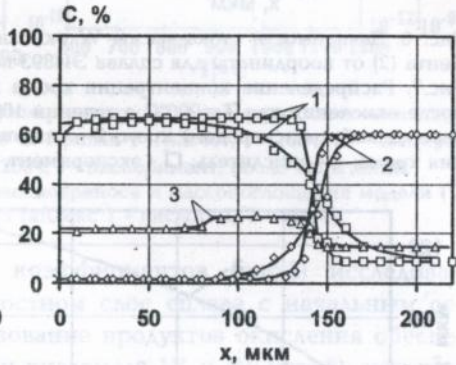
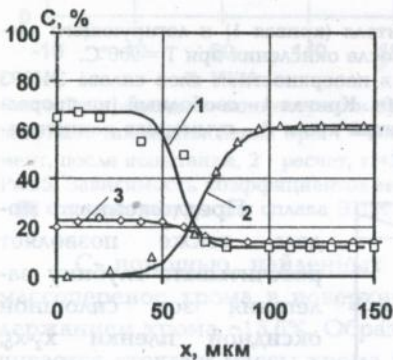


Рис.9. Распределение концентрации никеля, кобальта и хрома в покрытии СДПЗА на сплаве ЧС88ВИ при $T=900^{\circ}\text{C}$ после выдержки в течение $\tau=100\text{ч}$: Кривая 1 - кобальт; — - расчет, \square - эксперимент. 2 - никель; — - расчет, Δ - эксперимент. 3 - хром; — - расчет, \diamond - эксперимент.

Рис.10. Распределение концентрации никеля, кобальта и хрома в покрытиях СДП11-СДП8 на сплаве ЧС88ВИ при $T=975-1000^{\circ}\text{C}$ до и после выдержки в течение $\tau=100\text{ч}$: Кривая 1 - кобальт; — - расчет, \square - эксперимент, до и после испытаний. 2 - никель; — - расчет, Δ - эксперимент, до и после испытаний. 3 - хром; — - расчет, \diamond - эксперимент, до и после испытаний.

- трехслойное покрытие - сплав основы (КДП1 - СДП8 - СДП11А - ЧС88ВИ) (рис.10), на основе экспериментальных распределений концентраций никеля, кобальта и хрома в покрытиях и основе для одного момента времени ($\tau=100\text{ч}$). Для двухслойного покрытия (см. рис.9) были найдены следующие коэффициенты диффузии Ni, Co, Cr, дающие концентрационные распределения в покрытиях и основе, близкие к экспериментальным: $D_{\text{Ni}} = 2 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$, $D_{\text{Co}} = 1 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$, $D_{\text{Cr}} = 1 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$.

Расчетные концентрационные распределения удовлетворительно согласуются с экспериментальными. Для трехслойного покрытия было проведено аналогичное расчетное определение констант диффузии. На рис.10 приведены расчетное и экспериментальное распределение хрома, которые удовлетворительно согласуются между собой. Коэффициент взаимной диффузии хрома в системе СДП11А-СД18-ЧС88ВИ имеет значение $D_{Cr} = 0,5 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$.

Четвертая глава посвящена прогнозированию процессов тепломассообмена лопаток газовых турбин. Проверочный расчет для 60000 часов (настройка модели), (рис.11), показал хорошее согласование с распределением концентрации на спинке и корытце лопатки вынутой после ~60000 часов эксплуатации из газовой турбины ГТ700-4 работающей на природном газе.



Рис.11. Распределение суммарного хрома на корытце и спинке лопатки из сплава ЭИ893 в различные моменты времени. \square - эксперимент $\tau = 60000 \text{ ч}$; 1 - расчет, $\tau = 60000 \text{ ч}$; 2 - расчет, $\tau = 100000 \text{ ч}$.

Рис.12. Временная зависимость толщин зон сплошной оксидной пленки Cr_2O_3 (кривая 1), внутреннего окисления (2) и обезлегирования (3) на корытце и спинке лопатки из сплава ЭИ893.

С помощью найденных параметров массопереноса (рис. 5) был проведен прогноз распределений концентраций хрома (рис.11), а также толщины сплошной оксидной пленки, зон внутреннего окисления и обезлегирования на спинке и корытце лопатки - на 100000 часов эксплуатации (рис.12).

Сопоставление расчетных значений толщин сплошной оксидной пленки для 60 000 часов на спинке и корытце ($28,36 \cdot 10^{-6}$ и $14,1 \cdot 10^{-6}$ м соответственно) с экспериментальными значениями ($28,2 \cdot 10^{-6}$ и $14,6 \cdot 10^{-6}$ м соответственно), показывает хорошее согласование.

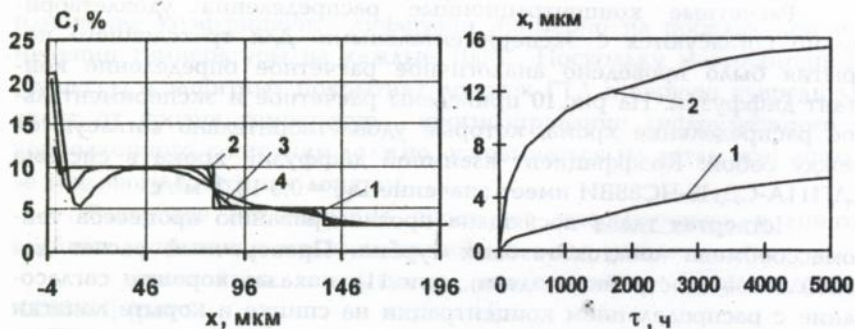


Рис.13. Распределение концентрации суммарного алюминия в сплаве ЧС88ВВ1 и покрытиях СДП8-СДП11А в различные моменты времени. Кривая 1- $\tau=0$ ч. 2-100ч. 3-1000ч. 4- 5000ч.

Рис.14. Зависимость толщины зон, затронутых окислением для оксида алюминия Al_2O_3 в покрытии СДП8-СДП11 и сплаве ЧС88ВВ1 от времени. 1- зона сплошной оксидной пленки 2 - зона внутреннего окисления

Для расчетного прогнозирования процессов массопереноса в системе защитные покрытия-лопатка ГТД с внешним керамическим слоем была выбрана следующая схема разрушения многослойной системы КДП1-СДП11А-СДП8-ЧС88ВВ1. На первом этапе керамический слой КДП1 присутствует. Образование оксидной пленки на первом этапе в основном обеспечивается алюминием как наиболее термодинамически активным элементом. При достижении критической толщины пленки Al_2O_3 керамический слой КДП1 скалывается, обнажая металлическое покрытие СДП8. Наступает второй этап разрушения защитного покрытия - без внешнего керамического слоя. При этом повышается температура внешнего металлического слоя на $\sim 50^\circ C$, процессы окисления обедненного алюминием поверхностного слоя ускоряются как за счет увеличения температуры, так и увеличения потока окислителя в случае отсутствия внешнего керамического слоя. На втором этапе образование защитного коррозионного слоя в основном обеспечивается хромом. Критерием долговечности системы защитные покрытия-лопатка ГТД в этом случае является сумма времен $\tau_{кс}$ образования оксидной пленки Al_2O_3 критической толщины и $\tau_{мс}$ проникновения окисления на всю толщину металлического покрытия. Для значений коэффициентов $D_1 = 1 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2/\text{с}$, $D_2 = 7 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2/\text{с}$, $k_1 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/с}$, $k_2 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/с}$, $\beta_1 = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$,

$C_1 = 10\%$, $C_2^{c_{max}} = 20\%$ ($i=1$ - кислород, $i=2$ - алюминий) рассчитаны распределения концентрации суммарного алюминия и временные зависимости роста зон сплошной оксидной пленки x_1-x_0 и внутреннего окисления x_2-x_1 . Результаты расчетов приведены на рис.13,14.

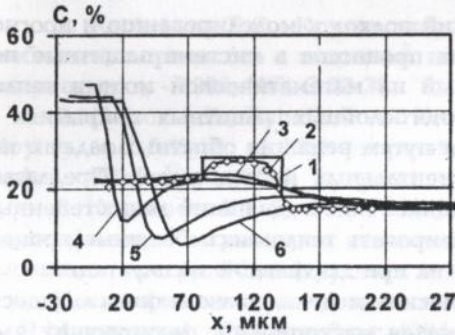


Рис.15. Распределение суммарного хрома в сплаве ЧС88ВИ и покрытиях СДП8-СДП11А в различные моменты времени. □ - эксперимент. Кривая 1 - расчет, $\tau=0$ ч. 2 - расчет, $\tau=100$ ч. 3 - расчет, $\tau=4000$ ч. 4 - расчет, $\tau=8000$ ч. 5 - расчет, $\tau=20000$ ч. 6 - расчет, $\tau=32000$ ч. □ - эксперимент, после испытаний $\tau=100$ ч.

ских покрытий продолжается далее с образованием оксидной пленки, содержащей в основном Cr_2O_3 . Рост пленки Cr_2O_3 происходит аналогичным образом, за исключением того, что состав поверхностного металлического слоя существенно отличается от исходного к моменту скалывания керамики. Диффузионное перераспределение хрома без образования коррозионного слоя до момента скалывания керамического слоя (100 и 4000 ч) показаны на рис.15 (кривые 1 и 2).

Концентрационные кривые распределения суммарного хрома после скалывания керамики (кривые 3 - 6) для нескольких моментов времени были рассчитаны при следующих коэффициентах модели: $D_2=5 \cdot 10^{-17}$ м²/с, $D_1=1 \cdot 10^{-16}$ м²/с, $k_2=9 \cdot 10^{-7}$ 1/с, $k_1=4.5 \cdot 10^{-7}$ 1/с, $\beta_1=4.5 \cdot 10^{-10}$ м/с, $C_1=10\%$, $C_2^{c_{max}}=45\%$, ($i=1$ - кислород, $i=2$ - хром) найденных решением обратных задач с использованием экспериментальных данных. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывает, что предложенная модель качественно и

В зависимости от условий испытаний или эксплуатации, адгезионной способности и технологии нанесения керамики критическая толщина пленки Al_2O_3 может достигать нескольких микрон. С учетом имеющихся данных экспериментальных исследований принято допущение, что при достижении пленки Al_2O_3 критической толщины 4 мкм, соответствующей расчетному времени $\tau=4000$ ч керамический слой КДП1 скалывается и коррозия (окисление) металличе-

количественно описывает сложные процессы массопереноса в защитных покрытиях лопаток ГТД.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан методический подход к моделированию и прогнозированию теплообменных процессов в системе защитные покрытия-лопатка ГТД, основанный на математической модели теплообменных процессов в многослойных защитных покрытиях и определении параметров модели путем решения обратных задач с использованием данных экспериментальных исследований. Предлагаемый подход в отличие от имеющихся на сегодняшний день степенных зависимостей позволяет прогнозировать теплообменные процессы в защитных покрытиях лопаток при длительной эксплуатации.

2. Разработана математическая модель, позволяющая осуществлять этот прогноз и описывающая массоперенос легирующих элементов и окислителя в зоны образования продуктов коррозии и кинетику образования оксидного слоя.

3. Исследовано тепловое состояние рабочей лопатки с охлаждающими каналами, проведена оценка тепловой эффективности применения керамического слоя в системе защитные покрытия - лопатка ГТД.

4. Исследован массоперенос в лопатке и образцах из сплава ЭИ893 без покрытий. Определена решением обратных задач температурная зависимость коэффициентов массопереноса модели для сплава ЭИ893, которая была использована при прогнозировании состояния лопатки.

6. Проведено расчетное исследование процессов массопереноса в системах защитные покрытия-лопатка: СДПЗА-ЧС88ВИ и СДПВ - СДП11А - ЧС88ВИ. Определены коэффициенты массопереноса которые были использованы для прогнозирования.

7. Проведено прогнозирование процессов массопереноса в лопатке ГТД без покрытий на времена до 100000 часов.

8. Проведено прогнозирование процессов массопереноса в системе защитные покрытия-лопатка ГТД с внешним керамическим слоем КДП1, отколовшимся в процессе эксплуатации лопатки. При долговечности керамического слоя 4 тыс.ч ресурс данной системы защитных покрытий составил ~30 тыс.ч.

Прогнозирование состояния поверхностного слоя лопатки с защитными покрытиями и без них при заданных температурно-временных условиях эксплуатации газовой турбины позволяет опре-

делять долговечность отдельных покрытий, сплавов и многослойных систем защитные покрытия-лопатка ГТД.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В РАБОТАХ:

1. Картавова Е.С., Круковский П.Г. Моделирование теплообменных процессов в защитных покрытиях лопаток ГТД // Пром. теплотехника, - 1996, №6, С.23-30.

2. Getsov L.B., Rybnikov A., Krukovski P.G., Kartavova E.S. De-alloying and fatigue of high-temperature alloys used for gas turbine blades. //Materials at High Temperatures, 1995, V.12, №12, pp.81-86.

3. Круковский П.Г., Гецов Л.Б., Картавова Е.С., Рыбников А.И. Идентификация параметров теплообмена в моделях прогноза высокотемпературной диффузии и газовой коррозии лопаток ГТУ. // В кн. Идентификация динамических систем и обратные задачи. Труды II Межд. конф., С.-Петербург, 1994, - т. 2, - с.Д.8.1- D.8.12.

4. Круковский П.Г., Картавова Е.С. Моделирование теплообменных процессов в деталях энергетических устройств с целью прогнозирования высокотемпературной газовой коррозии. // В кн. Теплообмен - ММФ - 96. Труды III-го Минского международного форума, Минск: АНК "ИТМО им. А.В.Лькова" АНБ, 1996, т. X, ч. 1, - с. 21 - 25.

5. Krukovsky P.G., Kartavova E.S. Numerical heat and mass transfer in components of power plants to prediction the high-temperature gas corrosion./ Proceedings of the 2nd European Thermal-Science and 14th UIT National Heat Transfer Conference, Rome, Italy, 29-31 May 1996, V.2, pp.1125-1130.

6. Krukovsky P.G., Kartavova E.S., Getsov L.B., Rybnikov A.I., Rabinovich A.A. The model of high temperature diffusion and gas corrosion of gas turbine blade // Materials ageing and component life extension, Proc. of Int. Symp., Italy, Milan, October, 1995, vol.1, pp.765-773.

7. Круковский П.Г., Картавова Е.С. Моделі та методи прогнозу високотемпературної корозії деталей енергетичного обладнання. /Проблеми металознавства та обробки сталей. Тези доповідей Всеукраїнського семінару, 27-28 вересня 1994 р., м.Київ.

8. Getsov L.B., Rybnikov A., Krukovski P.G., Kartavova E.S. De-alloying and fatigue of high-temperature alloys used for gas turbine blades. //Materials for Advanced Power Engineering 1994. Abstracts of Fifth Int. Conf., 3-6 October 1994, Liege, Belgium.1994, p. 44.

SUMMARY

Kartavova E.S. Simulation of heat and mass transfer processes in protective coatings of gas turbine blades. Thesis for Degree "Candidate of Technical Science" on speciality 05.14.05 - "Theoretical Thermal Engineering", Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1997.

A methodic approach for modelling and prediction of heat and mass transfer processes in the system protective coatings-gas turbine blade is proposed in this work. This approach is based on mathematical model of heat and mass transfer processes in multilayer protective coatings and. Identification model parameters by means of solving of inverse problems using experimental data. The mathematical model of mass transfer processes in multilayer protective coatings is developed. Mass transfer coefficients and their relationships from temperature were obtained for EI893 alloy. Modelling and predicting for mass transfer in blades and samples of EI893 alloy without coatings, in system protective coatings-gas turbine blade (SDP3A-ChS88VI, SDP8-SDP11-ChS88VI, KDP1-SDP8-SDP11-ChS88VI) were carried out. Comparison of calculated and experimental data are in good agreement.

АННОТАЦИЯ

Картавова Е.С. Моделирование теплообменных процессов в защитных покрытиях лопаток ГТД. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (специальность 05.14.05 - Теоретическая теплотехника), Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, 1997г.

В работе предложен методический подход к моделированию и прогнозированию теплообменных процессов в системе защитные покрытия-лопатка ГТД, основанный на математической модели теплообменных процессов при ВТГК и определении параметров модели путем решения обратных задач с использованием данных экспериментальных исследований. Разработана математическая модель массообменных процессов в многослойных защитных покрытиях. Найлены решением обратных задач коэффициенты массопереноса для сплава ЭИ893 и их зависимость от температуры. Проведено моделирование и прогнозирование процессов массопереноса в лопатках и образцах из сплава ЭИ893 без покрытий и в системах защитные покрытия-лопатка ГТД; СДП3А-ЧС88ВИ и СДП8 - СДП11А - ЧС88ВИ, КДП1-СДП8-СДП11А-ЧС88ВИ. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывает хорошее их согласование.

Ключові слова: тепломасообмін, математичне моделювання, газові турбіни, лопатки, ресурс, прогнозування.

AB 37.731